

## ガウスの加速器を用いた出張講義

—興味を持たせ、関心を高め、理解を深める理科教材の開発—

The Gauss Accelerator in the off-campus lectures

近藤 一史\*  
Hitoshi KONDO

大柿 千絵\*\*  
Chie OGAKI

奥山 雄三\*\*\*  
Yuzo OKUYAMA

三俣 那津子\*\*\*\*  
Natsuko MITSUMATA

桐原 昌秀\*\*\*\*  
Masahide KIRIHARA

大向 隆三\*  
Ryuzo OHMUKAI

### 1. はじめに

埼玉大学教育学部理科教育講座物理学教室では、児童・生徒に「興味を持たせ、関心を高め、理解を深める」教材の開発を行っている。不思議な現象、魅力的な現象で、児童・生徒に興味・関心を与え、理科への学習意欲を高め、理解を深めることが目的である。卒業研究として多くの学部4年生が、「興味・関心」を持たせることを目的とした教材開発を行ってきた。開発した教材は、小学校・中学校の授業などで利用して、児童・生徒に興味・関心を与えることができるかを検証する必要がある。しかし、卒業研究で開発した教材の小学校・中学校の授業実践は難しく、なかなか検証の機会は得られなかった。しかし、平成17年11月、戸田市教育委員会が行っている「理科大好き特別授業」事業において、戸田市立喜沢中学校で出張講義を行い、実践での検証の機会を得た。出張講義では、「家庭用電気の直列つなぎ、並列つなぎ」、「ネガティブ・レンズ」、「ガウスの加速器」の3つの実験を行った。「ガウスの加速器」はその年に卒業研究のテーマとして研究を始めたばかりであったため、紹介する程度と考えていた。ところが、3つの実験のうち、生徒にとっては「ガウスの加速器」が最も関心が高いという結果となった。「ガウスの加速器」は、児童・生徒はもちろん、大人にも興味・関心を与える実験教材である。「ガウスの加速器」が出張講義で児童・生徒に興味・関心を与える実験教材として有効であると考え、開発を進めた。本論文では、「ガウスの加速器」ならびにそれを用いた出張講義について報告する。

### 2. ガウスの加速器

「ガウスの加速器」は、James A. Rabchuk<sup>1)</sup>により「ガウスのライフル」という名称で報告された実験教材である。しかし、「ライフル」という名称が教育現場にふさわしくないとのことで、David Kagan<sup>2)</sup>が同様の実験教材について、その運動量とエネルギーについての報告を行った際、「ガウスの加速器」と名称が変更され、現在に至っている。

近年開発されたネオジム磁石は、現在最も磁力の大きな永久磁石である。このネオジム磁石が容易に入手できるようになり、これを利用した理科実験教材も数多く開発されている。「ガウスの加速器」も、このネオジム磁石を利用した物理実験教材である。磁石の持つ磁気エネルギーを運動エネルギーへと変換する物理現象を演示する教材である。ネオジム磁石の大きな磁力のために、非常に不思議な現象としてとらえられ、人々に興味・関心を与えるものである。さらに、この現象には、運動量の保存、エネルギーの保存、衝突、磁気エネルギー、運動エネルギーなど物理学において重要な学習内容を含んでいるため、高等学校においては発展的な学習として利用価値が高いと思われる。

James A. Rabchukの「ガウスのライフル」は、1辺が12mmの四角形のネオジム磁石4つと、半径0.795cm(直径約16mm)の鋼球9つを使用したものである。4つのネオジム磁石は、それぞれの極(論文ではN極)を同じ方向に向け、2インチ(約5cm)の間隔で配置した。図1のように、それぞれの磁石のN極側に鋼球を2つずつくっつけたものが「ガウスのライフル」である。ここに、残り1つの鋼球をゆっくりと(初速度  $v \approx 0$ ) S極側に向

\* 埼玉大学教育学部理科教育講座

\*\* 宇都宮市立宮の原小学校

\*\*\* 東京都荒川区立第一中学校

\*\*\*\* 埼玉大学教育学研究科

かって転がす。すると、磁石近くで加速され、磁石にぶつかると、磁石にくっついていて鋼球の1つが飛び出し、勢いよく次の磁石にぶつかる。つぎの磁石でも1つの鋼球が飛び出し、次々と加速していくのである。

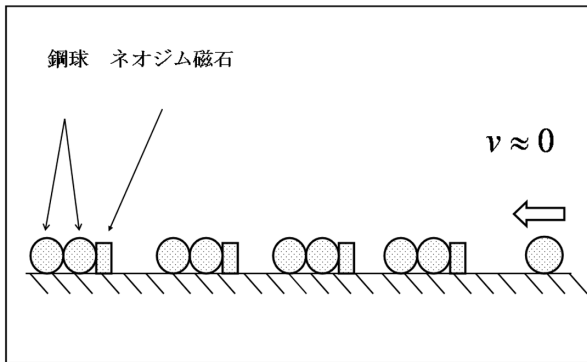


図1 「ガウスのライフル」

James A. Rabchukの「ガウスの加速器」では、四角形のネオジウム磁石の代わりに、直径8mmの球形のネオジウム磁石を使用している。「ガウスの加速器」では、1つのネオジウム磁石と3つの直径5/15-in (0.313-in : 7.93mm)を使用している。用意する磁石は1つであるが、「ガウスのライフル」と同様に、磁石の1方の極(S極)に鋼球2つをくっつける。そして、残り1つの鋼球を磁石(N極)に向かって、ゆっくりと(初速度  $v \approx 0$ )転がすと、磁石近くで引きつけられ、加速して磁石にぶつかる。すると、「ガウスのライフル」と同様に、磁石の反対側(S極側)から鋼球1つが加速され勢いよく飛び出す(図2)。

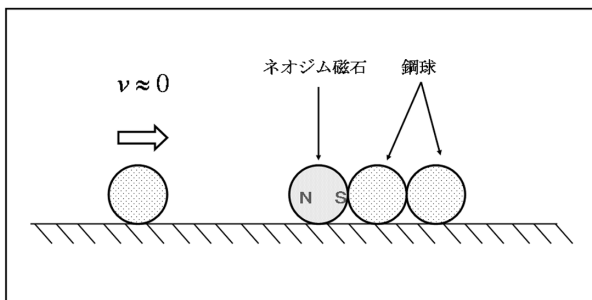


図2 「ガウスの加速器」  
磁石の向きが「ガウスのライフル」と逆になっているが、これは論文に掲載された方向である。

「ガウスのライフル」、「ガウスの加速器」(以降、「加速器」とする)とともに、入射する鋼球の速さがほとんど0にもかかわらず、磁石に衝突すると、反対側から加速されて勢いよく鋼球が飛び出す。中学生は理科第1分野の「運動とエネルギー」の単元で、エネルギー保存則を学習する。高校生は、衝突や運動量を扱う際に、運動量の保存則を学習する。「ガウスの加速器」では、入射する鋼球の持つ運動エネルギーや運動量がほとんど0にもかかわらず、勢いよく鋼球が飛び出すが、この現象は、エ

ネルギーの保存則、運動量の保存則に反することになる。鋼球が勢いよく飛び出す現象の面白さに加え、学習した法則が成り立たない現象を体験することで、エネルギーや運動量に関してより深く学習する動機付けとなる教材となると考えられる。

物理学教室では「ガウスの加速器」が報告された翌年の平成17年<sup>3)</sup>と18年<sup>4)</sup>の2年間、「ガウスの加速器」を卒業研究のテーマとして、運動エネルギーや運動量の測定、磁気エネルギーの測定への可能性について研究を行った。「ガウスの加速器」は高等学校で学習する内容が含まれている。これを、小学校・中学校で行う出張講義で行うために開発を行ってきた。

### 3. 実験装置

ここで、我々の研究室で開発してきた「ガウスの加速器」の実験装置について述べる。

ネオジウム磁石ならびに鋼球は、直径10mmと直径15mmの球形のものを用意した。簡単に入手できるようになったが、ネオジウム磁石は高価であるため、当初は演示には直径15mmのネオジウム磁石を用い、児童・生徒は直径10mmのネオジウム磁石を用いて実験を行っていた。しかし、直径10mmよりも直径15mmのネオジウム磁石を用いて実験を行った方が、「ガウスの加速器」での面白さを十分体験できるため、現在では直径15mmのネオジウム磁石で実験を行っている。

「ガウスの加速器」で実験を行う際には、鋼球を転がすためのレールが必要となる。James A. Rabchukの論文では、木製のレールを準備することが推奨されている。これは、ネオジウム磁石を固定する際に磁力が影響しないためのものと考えられる。球形の磁石を用いる「ガウスの加速器」においては、磁石を固定することは無いが、磁力の影響が無い方が望ましい。しかし、木製のレールは入手しづらく、出張講義用には10本程度が必要になるので、加工の必要のない完成品が好ましい。そこで、電気のコードを壁や床に貼り付けるためのプラスチック製コードカバー(2つに分かれるので、コの字の部分を利用する)と、アルミニウム製コの字チャンネルをレールとして利用することを考えた。プラスチック製のレールは磁力の影響が無いので良いと思われたが、アルミニウム製のレールに比べて摩擦が大きく、鋼球の転がりが悪く、「ガウスの加速器」の加速の現象も小さいため、出張講義用には、アルミニウム製の長さ1m、厚さ1mm、12mm×12mmのコの字型チャンネルを用いている(直径15mmのネオジウム磁石用)。児童・生徒が使用することを考慮して、ヤスリをかけて角を丸く仕上げている。なお、直径10mmのネオジウム磁石用には厚さ1mm、10mm×10mmのアルミニウム製コの字型チャンネルを使用した。

金属製のレールを用いると、鋼球を転がす場合には問題が無いが、磁石を転がす場合には渦電流が発生する。アルミニウム製のレールは磁石にくっつかないので磁

力の影響は受けない。しかし、磁石が転がると渦電流を発生し、渦電流が作る磁界によって磁石の回転を妨げようとする力が発生する。基本的な「ガウスの加速器」の実験においては、磁石は転がさないで問題はない。しかし、応用実験において渦電流が影響する場合がある。例えば、磁石を転がしても磁気エネルギーを運動エネルギーに変換することができる。この場合、磁石を転がすと渦電流の発生により、磁石の回転がおそくなる。鋼球と同じようにゆっくりと転がすと、途中で止まることがある。渦電流の効果は、不思議な現象であるので、興味・関心を与えるので、むしろ良い現象であるが、「ガウスの加速器」と同時に渦電流による現象を認識するのは難しいと思われる。しかし、実際に実験を行うと、児童・生徒の関心は「ガウスの加速器」の鋼球の加速の現象に集まるので、特に心配はいらないようである。むしろ、プラスチック製レールよりもアルミニウム製レールの方が摩擦の影響が少なく、「ガウスの加速器」の加速度を十分に楽しんでもらう結果となった。

プラスチック製レールは容易に曲げることができる。このことを利用して、鋼球の初速度を変化させたり、飛び出した鋼球の運動エネルギーを調べたりする際にプラスチック製レールを使用した。

#### 4. 「ガウスの加速器」を用いた出張講義

「ガウスの加速器」は、エネルギー保存則、運動量保存則、衝突など高等学校の内容を含んでいる。この実験を小学校・中学校の出張授業で行うためには、小学生・中学生でも理解できる内容にする必要がある。

また、「ガウスの加速器」は、鋼球を磁石に向かってゆっくりと転がすと、磁石の衝突し、反対側の鋼球が勢いよく飛び出すという実験で、児童・生徒に興味・関心を与えることができるが、それだけでは、少しの時間で終わってしまう。出張講義では、実験を小・中学校での45分または50分の授業時間で組み立てる必要がある。

2つの問題を解決するため、「ガウスの加速器」の実験と「衝突実験」を組み合わせた教材を考えた。「衝突実験」は、やはり高等学校で扱う運動量を学習する際の課題であるが、日常生活や子どもの玩具（図3）などで目にする機会も多く、小学生・中学生にも十分理解できる内容である。

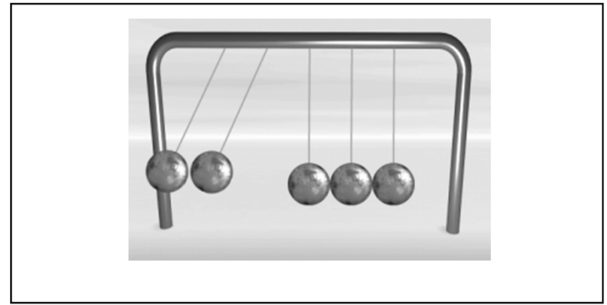


図3 衝突実験の玩具  
「ニュートンのゆりかご」、と呼ばれることもある。鋼球を一方からぶつけると運動量の保存則に従って反対側に鋼球が飛び出す。「ガウスの加速器」はこの法則に反した動きをする。

#### (1) 衝突実験

「ガウスの加速器」の実験を行う前に、エネルギー保存則、運動量保存則の学習のために、「衝突実験」を行う。

出張講義では、1グループ4人で、1クラス8グループで行うことが多い。実験装置は1グループに1セットずつ配り、グループ毎に実験を行っている。

最初に、レールと鋼球4つを各グループに配る。これは、「ガウスの加速器」で使用するネオジウム磁石1個を1つ鋼球に入れ替えたものである。このとき、鋼球を紙コップに入れて配布することで、実験中に鋼球をなくすことを防いでいる。

ヤスリで丸くしてあるがレールの角でけがをしないように注意すること。レールを振り回さないこと。鋼球を飲み込まないこと。鋼球を転がす際、人がいないことを確かめること。特に目に注意すること。などの注意事項をプリント（資料）に従って説明する。

続いて、プリント、プロジェクターにより、「衝突実験」について説明する。資料は川越市「理科ふれあい事業」で出張講義を行った時のプリントである。「衝突実験」は、「ガウスの加速器」で磁石を鋼球に置き換えた配置で実験を行うことになる（図4）。

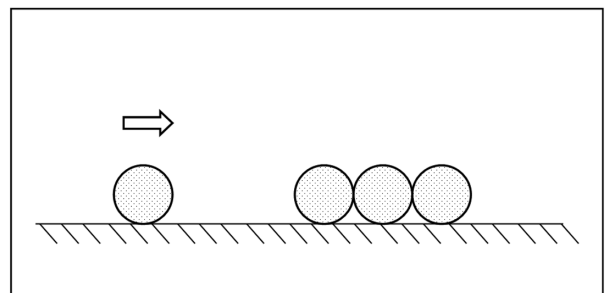


図4 衝突実験  
「ガウスの加速器」（図2）の磁石を鋼球におきかえ、すべて鋼球である。左から鋼球を色々な速さで転がし、飛び出した鋼球の数と速さに注目させる。

平成22年9月14日

# 「ガウスの加速器」

川越市「理科ふれあい事業」

川越市立霞ヶ関東小学校

埼玉大学教育学部物理学教室

近藤 一史、岡山 江梨子

高坂 泰裕、柳川 秀臣

## ☆ 注意とお願い ☆

1. 用意した実験装置は、手作りのためにとがった部分があります。けがをしないようにして下さい。
2. 金属の球を飲み込んだりしないで下さい。
3. 金属の球を力一杯転がしたりすると危険です。球を転がす場合は、転がす方向に人がいないか（特に顔や目）確かめ、十分に注意して実験を行って下さい。

## 【実験1】 衝突実験 その1 鉄球を3つ使います

- 実験 : 1. レールの上に鉄球を2個、くっつけて並べて置きます。
2. もう一つの鉄球を並んでいる2つの鉄球にぶつけます。予想して、実験してください。
- 注意：レールの反対側に人がいないことを注意して下さい。**
3. 飛び出す鉄球の速さ、数などに気をつけて観察して下さい。
4. ぶつける鉄球の速さを変えて実験してみてください。

## 【実験2】 衝突実験 その2 鉄球の数を増やします

- 実験 : レールの上にならべる鉄球の数を増やして、「その1」と同様の実験を行いましょう。
- ぶつける鉄球の数を増やして実験してみてください。

**【実験3】 ガウスの加速器**

実験 : ガウスの加速器を用いた実験を前で行ってみます。

実験の方法については黒板（またはスクリーン）で説明します。

各班で、ガウスの加速器の実験を行って下さい。

**【実験4】 ガウスの加速器 応用編**

実験 : 実験3でガウスの加速器の基本的な配置を紹介しました。鉄球の数、置き方を変えてみましょう。

どのような時に、ガウスの加速器の働きをするのか色々と試してみましょう。

磁石をぶつけることも試してみましょう。

**【実験5】 ファラデーモーター 釘を使用するので注意！**

実験 : 前で説明するように、ミノ虫クリップ、アルミ箔、釘、電池などをつかって組み立てます。

**【実験6】 おまけの実験 時間があったら行います。**

実験 : 演示実験ですので、前の机で行います。

実験では、

- ① 球がぶつかった後、反対側に飛び出す球の数。
  - ② ぶつける球の速さと、飛び出す球の速さの関係。
- に注意して、記録し発表させる。

理想的な弾性衝突（跳ね返り係数  $e = 1$ ）の場合、並べた球1つに球1つを衝突させると、ぶつけた球が止まり、並べてある球が飛び出していく。これが運動量の保存則である。一般には、弾性衝突は起こらず、ぶつけた球は止まることなく、遅くはなるが飛び出した球を追いかけるように転がる。そのため運動量の保存則が成り立つことを示すことはできない。

そこで、本実験のように、3つの鋼球を並べることで、ぶつかった球が次の球の存在のために止まり、運動量の保存則を体験することができる。



写真1 衝突実験、ガウスの加速器の様子

各グループで10分ほどの実験を行かせた後、

- ① 1つ球がぶつかると、反対側から球が1つ飛び出す。
- ② ぶつける球の速さを速くすると反対側から飛び出す球は速くなり、ぶつける球の速さを遅くすると反対側から飛び出す球は遅くなる。

ことを発表させ、確認する。（写真1）

次に、鋼球をさらに2つ配り、

- ① 球がぶつかった後、反対側に飛び出す球の数。
- ② ぶつける球の速さと、飛び出す球の速さの関係。

について、2つ以上の球をぶつけた場合について調べさせる。2つ以上の球をぶつける際は同時にぶつける必要があること。そのためには少し手で長めに保持するとやり易い。など注意を与える。様々な条件で実験を行いたいグループには、希望に応じて鋼球を配る。

鋼球を追加して10分ほどで、同様に実験結果について発表させ、確認を行う。

実験の結果から、衝突実験において、①反対側に飛び出す球の数、②ぶつける球の速さと飛び出す球の速さ、に規則性があることを見つけ出させる。これらを「運動量の保存則」「エネルギーの保存則」と言って、高等学校

で学習する内容であると紹介する。

## （2）「ガウスの加速器」の演示

「衝突実験」の内容をまとめた後、演示実験によって「ガウスの加速器」説明を行う。この演示では、先ほど学習したばかりの、「運動量の保存則」「エネルギーの保存則」が成り立たない例を見せて、興味・関心を与える。

まず、「ガウスの加速器」とは異なる位置にネオジム磁石を配置し、鋼球を転がしてぶつける実験を行う（図5）。この時、児童・生徒に結果を予想させる。当然、「運動量の保存則」「エネルギーの保存則」を満たすような結果を発表する。しかし、実験ではネオジム磁石のために、鋼球が衝突しても反対側から鋼球は飛び出すこと無しに全体が止まるという結果になる。

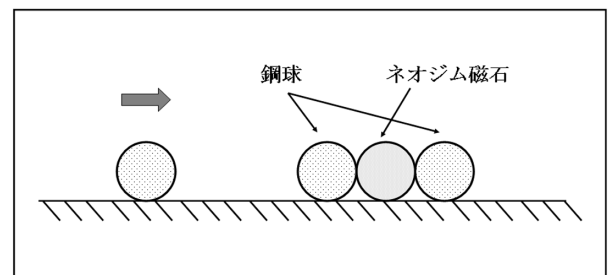


図5 演示実験

「ガウスの加速器」の実験を説明を行う前に行う。「ガウスの加速器」（図2）の磁石の位置が2つの鋼球の間に配置されている。左から鋼球を転がして、ぶつけても、反対側から鋼球は飛び出さない。

児童・生徒は、「どうしてだろうか?」と考える。もう1度同じ実験を行うと、たいていの場合、3つの球を並べる時の様子から、球のなかに磁石が含まれていることに気づく児童・生徒が現れる。磁石が入ることで、「運動量の保存則」「エネルギーの保存則」が成り立たないことが起きることを説明する。

次に、「ガウスの加速器」（図2）の演示を行う。「ガウスの加速器」を実演すると、飛び出す鋼球に、児童・生徒だけでなく、見学している先生方もかなりの興味を示す。児童・生徒からは、早く実験したいという気持ちが伝わってくる。「ガウスの加速器」で、ならべる鋼球とネオジム磁石の配置を説明する。

## （3）「ガウスの加速器」各グループでの実験

各グループで「ガウスの加速器」を行うために、ネオジム磁石を配る。その際、磁石が強力であるために、磁石の影響を受けるもの（磁気カード、磁気定期券、時計など）を近づけないこと。磁石が鋼球や鉄製品とくっつく際に手などを挟まれないこと。などの注意を行う。

各グループの力持ちと思われる児童・生徒に、ネオジム磁石を、いくつかくっついた状態から1つを引っ張り、取り外させる。このことにより、ネオジム磁石の磁力を体感させ、注意が必要であることを実感してもらう。

まず、基本的な配置で実験してもらう。「ガウスの加速器」を実感したのち、手元にある鋼球をいろいろに配置

して、どのような場合に加速し、どのような場合には加速しないのかについてまとめるよう指示する。

また、希望のグループには、磁石を転がす実験や、2つ（以上）の磁石を配置する実験についても行わせる。

「ガウスの加速器」の実験は、配置によって色々な結果が生まれるので、興味は尽きない。しかし、最近、物理学教室で行っている出張講義では、ネオジム磁石を用いた別の実験を行っている。授業終了15分前に「ガウスの加速器」の実験を終了させ、「ガウスの加速器」の原理についての説明を行う<sup>5)</sup>。エネルギーを使つての説明であるので、同様に高等学校で学習する内容であることを紹介する。説明の後、次の実験を行うことを告げる。

#### （４）ファラデーモーター

ネオジム磁石という強力な永久磁石が容易に入手できるようになったことで「ガウスの加速器」の実験を行うことが可能になった。同様に、ネオジム磁石を利用することでファラデーモーターの実験も可能になった。ファラデーモーターは、単極モーターとも呼ばれる。モーターは、小学校でも取り上げられる内容であり、「コイル」と「磁石」で作られていることを学習する。ところが、ファラデーモーターは「コイル」の無いモーターで、簡単な構造で回転する。これも不思議な現象として、興味・関心を与えることができる。

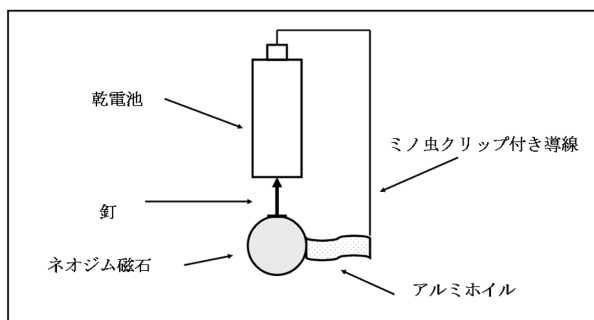


図6 ファラデーモーター

用意する物は、ネオジム磁石、釘、アルミホイル、ミノムシクリップ付き導線、単3乾電池、である。実験では、ネオジム磁石を使用する上に、釘を使用するので新たに磁石、釘の取り扱いについての注意を与える。

ファラデーモーターは図6に示すような構造である。実験は2人で協力して行うと上手くできる。(写真2)

手順は

- 1) アルミホイルを2つに折り、2cm×6cmくらいの短冊をつくる。これをミノムシクリップ付き導線の1方のミノムシクリップではさむ。
- 2) アルミホイルをはさんだ反対側のクリップで乾電池のプラス極をはさむ。
- 3) 磁石に釘をくっつける。
- 4) 乾電池のマイナス極に釘を近づけて、磁力で釘と磁

石をぶら下げる。(この時から2人で行うと良い)

- 5) ミノムシクリップではさんだアルミホイルでネオジム磁石の側面をふれる。その際、ミノムシクリップは磁石に引きつけられるので、近づけないようにする。



写真2 ファラデーモーターの実験

ファラデーモーターも、「モーターは「コイル」と「磁石」からできている。」という常識破るような、不思議な現象を見せてくれる。なぜ、このような簡単な仕組みで回るのかは、ネオジム磁石の強力な磁力のおかげである。これらの内容も、将来、高等学校で学習することを伝えることで、学習の意欲を高められると思う。

#### （５）アルコールロケット

資料にあるように、時間に余裕がある場合、「おまけの実験」を行っている。これは、アルコールを使ったロケットの実験である。出張講義では、次に引き続き正規の授業がある場合も多く、実験の後片づけが重要である。次にまだ実験があることで、児童・生徒は、「ガウスの加速度」で使用したネオジム磁石、鋼球、アルミニウムのレールなどの片づけを積極的に行うようになる。

アルコールロケットは、中学校理科の教科書にも紹介されている実験であるが、アルミニウム缶に穴を開けたり、ガスライターを利用したりするので、手間のかかる点や、安全性の点で、敬遠されている。物理学教室では、アルミニウム缶に工作することなく、ライターを使わない方法として、圧電素子を用いたアルコールロケットを開発した。(写真3)

厚さ1mmのプラスチック(PET樹脂材)から1.5cm幅のテープをつくり、その両端にアルミテープを貼り付ける。プラスチックテープの片方は導線で圧電素子につなぎ、他方を高電圧で火花が飛ぶようにアルミテープの幅を狭くして、アルミ缶の中に入れる。アルミ缶の中に霧吹きでアルコールを噴入し、紙コップでふたをする。アルミ缶を暖めて、アルコールの気化を促進し、圧電素子で火花を飛ばし、紙コップをとばす。

プラスチックテープと圧電素子を利用することで、作製が簡単になり、危険性も少なくなっているが、アルコールの量によっては、炎が出る場合もあるので、演示の際には児童・生徒に十分机から離れてみるように指示する必要がある。



写真3 アルコールロケットの実験

- 3) 大柿 千絵:「ガウス加速器」、埼玉大学教育学部理科教育講座物理学教室 平成17年度卒業研究論文
- 4) 奥山 雄三:「ガウス加速器の定量的解析と物理教材への応用に関する考察」、埼玉大学教育学部理科教育講座物理学教室 平成18年度卒業研究論文
- 5) 埼玉大学教育学部・教員養成GP推進本部:「平成19年度 文部科学省選定 「専門職大学院等教育推進プログラム」(教員養成GP) 実施報告書」(第1年次)、「平成20年度 文部科学省選定 「専門職大学院等教育推進プログラム」(教員養成GP) 実施報告書」(第2年次)

## 5. まとめ

物理学教室で、興味を持たせ、関心を高め、理解を深める、ための、物理実験の教材開発を行ってきた。開発当時は、開発した教材を実践で利用する機会に恵まれず、児童・生徒に興味・関心を持たせることができるのかを確かめることができなかった。平成17年戸田市の「理科大好き特別授業」に始まり、三郷市おもしろ遊学館、川越市小・中・大学連携理科ふれあい事業、さいたま市特別授業、科学者の芽育成プログラムなど、開発教材の実践的な利用が実現した。

その中で、「ガウスの加速器」は高等学校の内容であるが、小・中学生にも理解できる内容として提供し、大変不思議な現象を見せることで興味・関心を持たせることができるようになった。また、衝突実験、ファラデーモーターなどの活動を組み合わせ、45分から50分の授業時間に合わせたプログラムに完成することができた。

今後は、他の開発教材を実践的に利用できるようなプログラムに仕上げるとともに、新たに理科に興味・関心を持たせる教材の開発を進める予定である。

## 謝辞

本研究の一部は平成21～23年度科学研究費基盤研究(C)の助成により行われた。

## 引用・参考文献

- 1) James A. Rabchuk, "The Gauss rifle and magnetic energy," *Phys. Teach.* **41**, p158 (2003)
- 2) David Kagan, "Energy and Momentum in the Gauss Accelerator," *Phys. Teach.* **42**, p24 (2004)